

Vermessung von Spiegeloberflächen mit großen Krümmungsradien

Stephan Schneider, Frank Weidner, Jean-Michel Asfour

DIOPTIC GmbH, Bergstraße 92 A, 69469 Weinheim

<mailto:schneider@dioptic.de>

Es wird ein modulares Erweiterungskit zur interferometrischen Vermessung von sphärischen Spiegeloberflächen mit großen Krümmungsradien vorgestellt.

Die Prüfung optischer Oberflächen ist ein wichtiger Schritt der Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Spiegeln, Linsen, Plansubstraten oder anderen optischen Elementen. Das maßgebliche Prüfverfahren auf diesem Gebiet ist aufgrund der hohen Präzision die Interferometrie. Im Vergleich zum Profilometer liegen ihre Vorteile in der berührungslosen Messung und im Vergleich zu scannenden Verfahren in der zweidimensionalen Auflösung. Allein in dem Bereich von Oberflächen mit sehr großen Krümmungsradien gibt es geometriebedingte Vorteile tastender oder scannender Verfahren. Dieser Bereich kann mit dem vorgestellten Erweiterungskit nun ebenfalls interferometrisch abgedeckt werden.

1 Radenprüfung

Eine verbreitete interferometrische Methode zur Radenprüfung beruht auf dem Fizeau-Prinzip [1]. Die von einem Interferometer erzeugte ebene Welle (rote Pfeile, Abb. 1) wird von einem Messobjektiv in eine reflektierte Referenzwelle (blaue Pfeile) und eine Prüfwelle aufgespalten. Die Prüfwelle wird im Idealfall von dem Prüfling perfekt in sich zurück reflektiert. Damit ist ein interferometrischer Nulltest zwischen reflektierter Prüfwelle und der Referenzwelle möglich. Abbildung 1 zeigt die Radenmessung eines konkaven Spiegels mit dem Krümmungsradius R . Der Prüfling wird zunächst in der Brennebene im Abstand f zum Messobjektiv positioniert. Diese als Cateye bezeichnete Position ist mit Hilfe des Interferometers sehr genau zu bestimmen. Anschließend wird der Prüfling entlang der optischen Achse verfahren. Stimmt die Krümmung der Prüfwelle exakt mit der des Prüflings überein, ist die Prüfposition erreicht. Der Fahrweg R entspricht dem Krümmungsradius des Prüflings. Die Oberflächenabweichungen des Prüflings von der Sollform zeigen sich im Interferogramm direkt als Abweichungen von einer konstanten Phase. Durch Variation des Öffnungsverhältnisses f/D (D : Strahldurchmesser der einfallenden Welle) des Messobjektivs kann ein kontinuierlicher Messbereich von Krümmungsradien erzielt werden. Der Arbeitsabstand L ergibt sich aus $L = f + R$ und liegt bereits bei Krümmungsradien $R > 2\text{m}$ außerhalb typischer Labormaßstäbe.

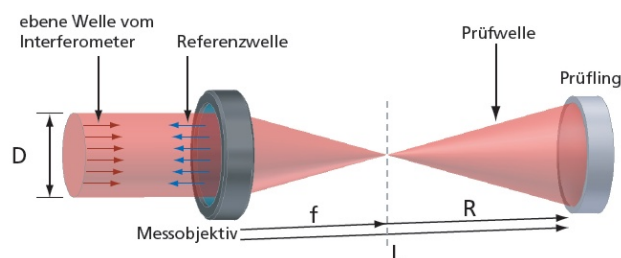


Abbildung 1 Radenmessplatz für eine konkave Spiegeloberfläche. Strahldurchmesser D , Krümmungsradius R der Spiegeloberfläche, Brennweite f , Abstand der Spiegeloberfläche zum Messobjektiv L .

Um das Problem dieser unhandlichen Messentfernungen bei großen Krümmungsradien zu umgehen und den Abstand L deutlich zu reduzieren, werden Messobjektive angeboten, die divergente Wellen erzeugen (Abb. 2a). In einer Anordnung mit divergenten Wellen fehlt aber ein realer Brennpunkt, und damit die Möglichkeit einer Wegkalibration über die Messung in Cateye-Position. Zudem gibt es wegen der endlichen Staffelung verfügbarer divergenter Messobjektive mit z.B. $R = 3\text{m}, 4\text{m}, 8\text{m}$, nach wie vor Konstellationen, die eine optische Bank mit sehr großen Messentfernungen erfordern: Für die Prüfung eines konkaven Spiegels mit einem Krümmungsradius von $R=12\text{m}$ mittels eines Messobjektivs mit einer Brennweite von $f=-8\text{m}$ ergibt sich ein Gesamtanstand von $L=4\text{m}$. Mit Hilfe des hier vorgestellten Erweiterungskits ist es dagegen uneingeschränkt möglich, bei einem Arbeitsabstand von etwa $L=0,8\text{m}$ den gesamten Bereich von Krümmungsradien oberhalb von $|R| \geq 1\text{m}$ interferometrisch zu prüfen.

2 Erweiterungskit

Das Erweiterungskit besteht aus vier Komponenten: einer diffraktiven Fizeau Null Linse (DFNL) [2], einem auf der optischen Achse verschiebbaren Achromaten, einer 5-Achsen-Prüflingshalterung und einer Software zur Radenberechnung. Die DFNL erzeugt diffraktiv optisch eine divergente Welle und ersetzt somit das sphärische Messobjektiv.

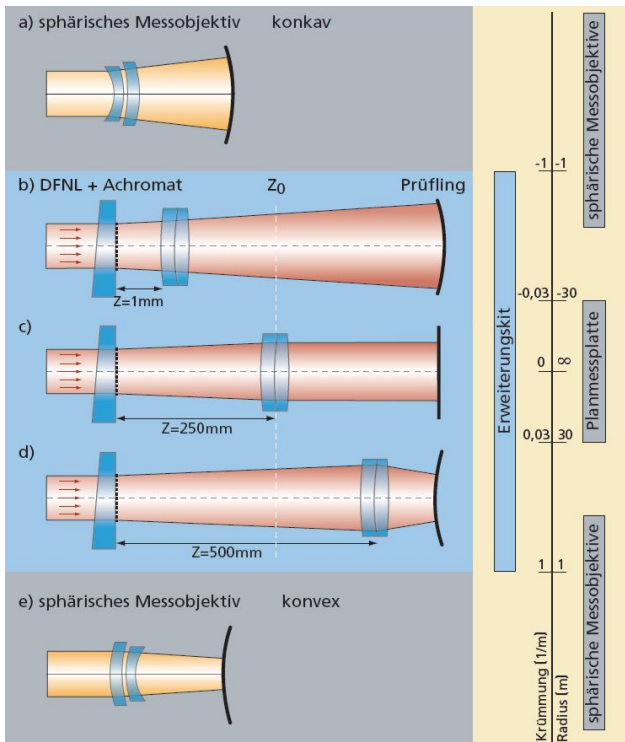


Abbildung 2 Übersicht über den Messbereich des Erweiterungskits im Vergleich zur klassischen interferometrischen Radenmessung mit sphärischen Messobjektiven.

Durch Variation des Abstandes zwischen der DFNL und dem Achromaten ist der Krümmungsradius der Prüfwelle in einem weiten Bereich durchstimmbär. Eine einfache Positionierung des Achromaten und des Prüflings entlang der optischen Achse wird durch in die DFNL integrierte Justagehologramme ermöglicht. Diese Hologramme erzeugen, ebenfalls diffraktiv optisch, Brennpunkte an definierten Positionen. Die Justage erfolgt dann analog zu der oben beschriebenen Radenmessung über das Antasten der Cateye-Positionen. Abbildung 2 vergleicht den Messbereich sphärischer Messobjektive (graue Balken) mit dem des Erweiterungskits (blauer Balken). Sphärische Messobjektive erfassen standardmäßig den Bereich für $|R| < 1,5\text{m}$ (Abb. 2a,e). Unter Verwendung einer Planmessplatte können zudem auch Oberflächen mit sehr großen Radien, $|R| > 30\text{m}$, geprüft werden. Das Interferogramm zeigt in diesem Fall die typischen Ringe einer sphärischen Abweichung des Prüflings vom Soll-Wert. Mit einer geeigneten Software kann das Interferogramm ausgewertet und der Krümmungsradius R des Prüflings berechnet werden. Diese Methode beruht nicht auf einem interferometrischen Nulltest, sondern erfordert eine entsprechende Bildauswertung des Inter-

ferogramms. Im Gegensatz dazu erzeugt das Erweiterungskit eine angepasste Prüfwelle und arbeitet über den gesamten Messbereich für $|R| > 1\text{m}$ mit einem Nulltest. Wird der Achromat dicht hinter der DFNL positioniert (Abb. 2b), ergibt sich eine divergente Welle für die Prüfung konkaver Krümmungsradien mit $R = -1\text{m}$. Bei maximalem Abstand des Achromaten zur DFNL (Abb. 2d) ergibt sich eine konvergente Prüfwelle, für den Test konvexer Krümmungsradien mit $R = +1\text{m}$. An der Z_0 -Position (Abb. 2c) ist die Prüfwelle eben, d.h. der Krümmungsradius R ist unendlich. Die dazwischenliegenden Z -Positionen liefern kontinuierlich einstellbare Krümmungsradien der Prüfwelle. Für einen gegebenen Prüfling wird interaktiv die Z -Position angefahren, bei der die mittlere Krümmung im Interferogramm minimal ist. Die Software berechnet dann aus der gefundenen Z -Position den dazugehörigen Krümmungsradius R des Prüflings. Das Interferogramm zeigt zusätzlich die Abweichungen des Prüflings von der idealen sphärischen Form.

3 Korrektur von sphärischen Wellenfrontfehlern

Ein Messaufbau mit dem Erweiterungskit entspricht nicht dem Fizeau-Prinzip, denn der verschiebbare Achromat wird nur von der Prüfwelle durchlaufen und nicht von der Referenzwelle. Sowohl die optischen Fehler des Achromaten als auch dessen Justagefehler beeinflussen direkt das Messergebnis. Der durch den Achromaten verursachte Restfehler der Wellenfront wird größtenteils durch sphärische Aberration bestimmt und kann durch das Polynom Nr.9 der Zernike-Fringe-Zerlegung beschrieben werden: $Z_9 = 6r^4 - 6r^2 + 1$. Üblicherweise erlaubt eine Interferometersoftware die Korrektur des Interferogramms in Bezug auf Zernike-Polynome. Subtrahiert man den Anteil des neunten Zernike-Polynoms Z_9 , so reduziert sich der Restfehler um mehr als eine Größenordnung und ist damit im gesamten Messbereich von $1\text{m} < |R| < 350\text{m}$ kleiner als $\lambda/10$ (PV).

Literatur

- [1] M.V. Mantravadi, "Newton, Fizeau, and Haidinger interferometers," in *Optical Shop Testing*, Daniel Malacara sec. ed. (John Wiley and Sons, New York, 1992), pp. 1–45.
- [2] J.-M. Asfour et. al., "Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram," in *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 23, 1, 2005, pp. 172–178.